

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Aplikační možnosti laserového gravírování
při značení vzorků**

**Application of the Laser Engraving during
Marking of the Samples**

Student: Martin Janoško

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Šárka Malotová

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Janoško**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2303R002 Strojírenská technologie
Téma: **Aplikační možnosti laserového gravírování při značení vzorků**
Application of the Laser Engraving during Marking of the Samples
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Technologie laserového řezání a gravírování.
3. Využití laserového gravírování při značení vzorků.
4. Zhodnocení a závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

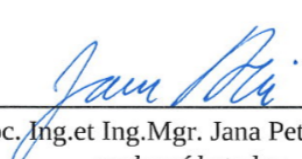
HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu – disertační práce*. Ostrava: VŠB – TU Ostrava Fakulta strojní, 2005. 101 s.
WHITNEY, E. Dow. *Ceramics Cutting Tools – Materials, Development and Performance*. Gainesville, Florida: Noyes Publication New Jersey, 1994, 350 p. ISBN 0-8155-1355-0.
ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina: Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.
MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technológie*, Viena Košice, 2000, s. 275, ISBN 80-7099-430-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Šárka Malotová**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry




doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Anotace

JANOŠKO, M. *Aplikační možnosti laserového gravírování při značení vzorků: Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2018, 47 s. Vedoucí práce: Malotová, Š.

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou popisování a gravírování různých druhů materiálů pomocí laserového zařízení. Teoretická část práce se zabývá popisem zařízení, přehledem základních typů laserů, možností nastavení jejich procesních parametrů, konstrukčním řešením, způsobem zanechávání stopy popisovače a aplikace, ve kterých je laserové zařízení používáno. V praktické části je testováno vhodné nastavení laserového zařízení, při značení 5 různých materiálů. Experiment byl proveden na oceli ČSN 11 373, slitině hliníku EN AW 7075, plexiskle XT, překližce a lepence. Každý vzorek byl podroben laserovému značení při odlišných hodnotách výkonu a posuvové rychlosti.

Klíčová slova: Laser, gravírování, značení, popisování, nekonvenční, CO₂

Summary

JANOŠKO, M. *Application of the Laser Engraving during Marking of the Samples: Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2018, 47 p. Thesis head: Malotová, Š.

This bachelor thesis deals with describing and engraving of different materials by laser device. The theoretical part deals with the description of the device, the overview of the basic types of lasers, the possibilities of setting their process parameters, the design solution, the method of leaving the marker mark and the applications in which the laser device is used. In practical part of work, I deal on marking and engraving of different types of materials and assessment of optimal conditions for setting of laser equipment. The experiment is carried out on steel ČSN 11 373, aluminum alloy EN AW 7075, XT plexiglass, gases and cardboard. Each sample was subjected to laser marking at different power and feed rates.

Key words: Laser, engraving, branded, describing, nonconventional, CO₂

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21.5. 2018



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 § 60 (Školní dílo),
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́домі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů – že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21.5. 2018



.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce: Martin Janoško

Adresa trvalého pobytu autora práce: K Hájku 310/16, Ostrava, 725 25

OBSAH

| | |
|---|-----------|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ | 8 |
| ÚVOD..... | 9 |
| 1 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ A GRAVÍROVÁNÍ..... | 10 |
| 1.1 PRINCIP LASERU | 10 |
| 1.2 LASEROVÝ PAPRSEK..... | 11 |
| 1.3 KONSTRUKCE ZÁKLADNÍHO LASERU | 12 |
| 1.4 DĚLENÍ LASERŮ PODLE ZÁKLADNÍCH DRUHŮ | 13 |
| 1.5 DRUHY LASERU..... | 17 |
| 1.5.1 Pevnolátkové lasery | 17 |
| 1.5.2 Nd:YAG laser | 18 |
| 1.5.3 Diskové lasery..... | 19 |
| 1.5.4 Vláknové lasery | 19 |
| 1.5.5 Plynové lasery..... | 20 |
| 1.5.6 Helium-neonový laser | 21 |
| 1.5.7 Argonový laser..... | 21 |
| 1.5.8 CO ₂ Laser | 21 |
| 1.6 PRŮMYSLOVÁ APLIKACE LASERU | 22 |
| 1.6.1 Laserové řezání | 22 |
| 1.6.2 Laserové svařování | 22 |
| 1.6.3 Vrtání laserem..... | 22 |
| 1.6.4 Laserové mikroobrábění | 22 |
| 1.7 LASEROVÉ GRAVÍROVÁNÍ A POPISOVÁNÍ..... | 22 |
| 1.7.1 Způsoby gravírování | 23 |
| 2 VYUŽITÍ LASEROVÉHO GRAVÍROVÁNÍ PŘI ZNAČENÍ | 24 |
| 2.1 LASER E4060 | 24 |
| 2.2 PRACOVNÍ POSTUP NA LASEROVÉM ZAŘÍZENÍ..... | 25 |
| 2.3 PŘÍPRAVA PRACOVNÍHO SOUBORU | 26 |
| 2.4 PASTA LMM 6000 | 27 |
| 2.5 MATERIÁLY | 27 |
| 2.5.1 Ocel ČSN 11 373 | 28 |
| 2.5.2 Slitina hliníku EN AW 7075..... | 29 |
| 2.5.3 Plexisklo XT | 30 |
| 2.5.4 Překližka | 30 |
| 2.5.5 Lepenka..... | 31 |
| 3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ..... | 32 |
| 3.1 OCEL ČSN 11 373..... | 32 |
| 3.2 SLITINA HLINÍKU EN AW 7075 | 34 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.3 | PLEXISKLO XT | 35 |
| 3.4 | PŘEKLIŽKA..... | 37 |
| 3.5 | LEPENKA..... | 39 |
| 4 | ZÁVĚR..... | 41 |
| 5 | SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 42 |
| 6 | SEZNAM OBRÁZKŮ..... | 45 |
| 7 | SEZNAM TABULEK | 46 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

| Značka | Veličina | Jednotka |
|---------------|----------------------------|------------------------|
| l | délka | [m] |
| M_e | intenzita vyzařování | [W·m ⁻²] |
| t | čas | [s] |
| v_c | řezná rychlost | [m·min ⁻¹] |
| v_f | posuvová rychlost | [mm·s ⁻¹] |
| P | výkon | [W] |
| λ | vlnová délka | [μm] |
| CNC | computer numerical control | |
| CW | continous wave | |
| DC | direct current | |
| Nd | neodymium doped | |
| PW | pulsed wave | |
| TOO | tepelně ovlivněná oblast | |
| USB | universal serial bus | |
| UV | ultrafialové záření | |
| YAG | yttrito-hlinitý granát | |
| 3D | trojrozměrný | |

ÚVOD

Laserový paprsek si můžeme představit jako velmi koncentrovaný světelný svazek. Z technologického hlediska se jedná o velice propracovaný systém, který se začal využívat od 60. let 20. století. Od té doby prošel laser velkým počtem konstrukčních změn.

Laser – význam slova pochází z anglického názvu Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, což lze volně přeložit: „zesílení elektro-magnetického záření (světla) pomocí vynucené (stimulované) emise“.

V současnosti stále rostou požadavky na kvalitu, životnost a přesnost laserového zařízení, proto se lasery musí neustále zdokonalovat. Laserová zařízení jsou silnější, přesnější, menší a hlavně levnější. Rostoucí tlak na zlepšování jakosti povrchu, tak tvarovou složitost nutí vědce přicházet s novými inovacemi.

V současné době se k označování materiálů využívá jak konvenčních, tak nekonvenčních metod. Mezi konvenční metody patří například značení pomocí lakových tužek, razidla a další. Mezi nekonvenční metody patří mikroobrábění a gravírování pomocí laseru. Za novým nekonvenčním použitím laseru při mikroobrábění stojí neustále zvyšování nároků na přesnost, zmenšování obráběných součástí a snižování výrobních časů.

Cílem bakalářské práce je zjistit optimální technické parametry logické podmínky laserového zařízení, aby bylo dosaženo nejlepšího výsledku značení na různých materiálech. Experiment se prováděl na oceli ČSN 11 373, slitině hliníku EN AW 7075, plexiskle XT, překližce a lepence. Každý vzorek byl podroben laserovému značení při odlišných podmínkách. Pomocí speciálního softwaru LaserCut byly nastaveny 4 hladiny gravírovaného obrazce, každý z nich měl technické parametry jiné, výkon v rozsahu (10–60) % a posuvovou rychlostí (150–300) mm·s⁻¹.

1 TECHNOLOGIE LASEROVÉHO ŘEZÁNÍ A GRAVÍROVÁNÍ

1.1 Princip laseru

Laser je sestaven ze dvou základních částí, první část je kvantový generátor a druhá je zesilovač vnitřně uspořádaného optického záření. Toto záření je unikátní svou extrémně vysokou monochromatickostí, což znamená, že celý svazek obsahuje stejnou barvu. Dále jej charakterizuje nízká rozbíhavost světelného svazku (obr. 1.1) a vysoká hustota energie, kterou je paprsek schopen přenést. (1)

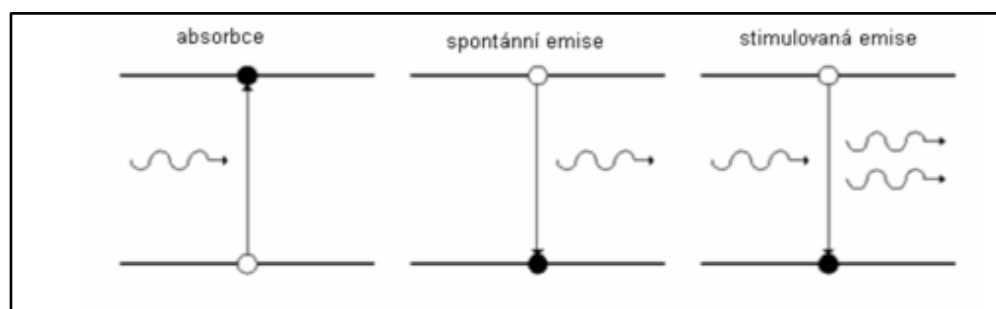


Obrázek 1.1 – Srovnání vyzařovaného světla laserem a žárovkou

Zdroj: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24662/hub%C3%ADk_2013_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fyzikální podstata laseru vychází z kvantové fyziky. Elektrony, které obíhají na kvantových drahách, mohou pohlcovat energii. Tato energie má původ mimo elektromagnetické záření. Prioritní je hodnota energie fotonu, který vytváří (budí) záření. Se vzrůstající energií předanou elektronu se může skokově dostat na vyšší kvantovou dráhu. Pokud je tato energie dostatečně vysoká, může dojít k ionizaci (oddělení elektronu od atomu) Elektron je schopen setrvat jen velmi krátce na horní kvantové dráze. (1, 2)

Stimulovaná emise se rozděluje na *samovolnou* (spontánní) nebo *vynucenou* (obr. 1.2). U samovolné emise se elektron bezpomoci dopraví na spodní dráhy. Oproti tomu u vynucené emise se elektron dostane na horní dráhy, kde musí počkat na foton, který do elektronu narazí a předá energii uvolněnému fotonu. Toto můžeme očekávat za předpokladu, že elektron sestoupí do nižší kvantové dráhy. (1, 2)



Obrázek 1.2 – Absorpce, spontánní a stimulovaná emise

Zdroj: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24662/hub%C3%ADk_2013_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

1.2 Laserový paprsek

Důvodem, proč jsou lasery široce používány je mnoho, ale patří mezi ne především unikátní vlastnosti laserového paprsku. Tento paprsek je velice sofistikovaný. Laserové záření se velmi odlišuje od běžných světelných zdrojů, které jsou například žárovka nebo plynová výbojka.

Laserový paprsek můžeme dělit podle základních vlastností paprsku:

a) Monochromaticnost

Monochromaticnost pochází z řeckého mono-chromos (jedna barva). Laser se liší oproti obyčejné žárovce hlavně v jednotnosti vlnové délky, což způsobuje jeho jednobarevnost. Vlnová délka je dána závislostí na rozdílu energetických hladin. Tato hladina nám určuje, v jaké části spektra jej najdeme. (2)

b) Koherence

Tyto paprsky jsou prostorově i časově naprosto stejně uspořádány, což se nazývá koherentní záření. Takto se označuje elektromagnetické záření, jehož zdroj kmitá pouze na jediné frekvenci. (2)

c) Divergence

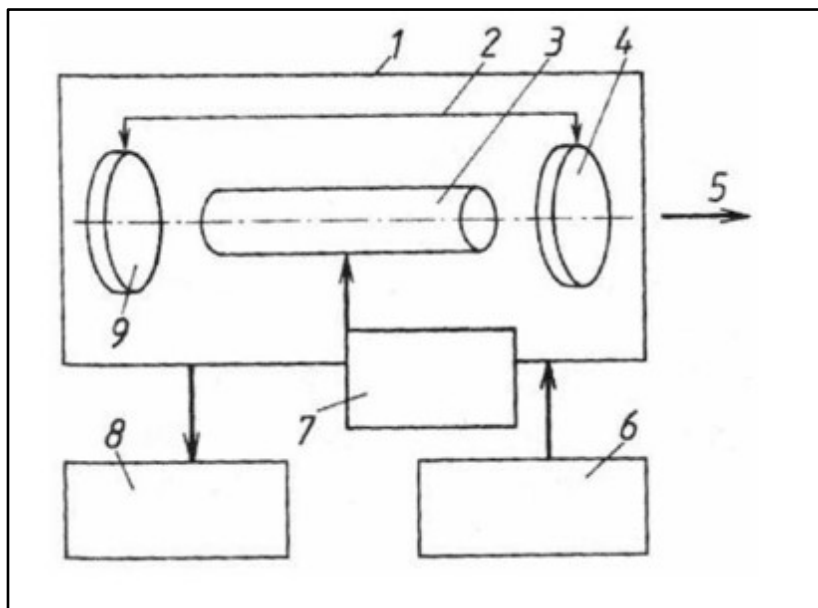
Divergenci můžeme také nazvat v našem případě jako rozbíhavost světelných paprsků. U laseru je divergence minimální. Tato vlastnost má za následek to, že jsme schopni přenést vysokou hustotu energie na relativně malou plochu. U laserů je vlnová délka malá, čehož využíváme u fokusace (zaostření). Jsme schopni více zaostřit, čím menší je vlnová délka paprsku, tím více jsme schopni soustředit paprsek na menší plochu. (2)

d) Polarizace

Polarizace světla znamená, že elektromagnetické vlnění stále kmitá v jedné rovině. Paprsek může být lineárně nebo kruhově polarizován. Běžné žárovky jsou nepolarizované. Pro víceúčelové použití laseru se doporučuje kruhová polarizace. (2)

1.3 Konstrukce základního laseru

Všechny lasery jsou konstrukčně téměř shodné. Základní části jsou: rezonátor s aktivním prostředím, budící zařízení a chlazení vodou nebo vzduchem (obr. 1.3).



Obrázek 1.3 – Konstrukce základního laseru

Zdroj: <http://www.strojirenstvi.wz.cz/image.php?subject=1&class=4&topic=41&image=0>

1) Laserová hlavička

Takto se označuje rám, ve kterém se nachází všechny aktivní prvky laserového zařízení. (1, 2)

2) Rezonátor

Tuto součást si můžeme představit, jako dutinu, ve které se nachází aktivní látka. Dutina je uzavřena pomocí dvou zrcadel, které mohou být buď v konfokálním stabilním nebo v konfokálním nestabilním uspořádání. Nejčastěji se objevuje konstrukční řešení s jedním polopropustným a druhým odrazivým zrcadlem. Takto sdružené zařízení má za následek vázané kmity (1)

3) Laserové médium

Laserové médium je hlavní součástí celého zařízení. Materiálu musí být průhledný a snadno budící. Laserové médium může být plyn (HeNe laser, CO₂ laser), kapalina (Rhodamin-barvivo), krystal (Rubín, Nd:YAG, Er:YAG), polovodič (GaAS, GaAsN) a plazma. (1, 2)

4) Polopropustné zrcadlo

Jedná se o skleněnou plochu, která je pokryta tenkým filmem kovu. Takto opatřené zrcadlo propustí světlo jen v případě, že dosáhne dostatečně velké energie. (1)

5) Výstup paprsku

Svazek světla, který dosáhl dostatečně velké energie, aby byl schopen projít polopropustným zrcadlem. (2)

6) Zdroj energie buzení

Speciální druh síťového napáječe dodávající do soustavy energii. (1)

7) Budící zařízení

Způsob, jakým je daný laser buzen závisí na médiu, pevné medium je buzeno opticky, plynné medium je nejčastěji buzeno elektricky. (2)

8) Chladicí systém

Při vytváření takto intenzivního světelného záření dochází k produkci velkého množství tepla, které je potřeba odvádět, abychom byli schopni využívat laser kontinuálně. Hlavním chladicím médiem je voda nebo vzduch. U výkonných zařízení je soustava chlazená pomocí dejonizované vody. Běžně jsou laserová zařízení chlazená vzduchem. (2)

1.4 Dělení laserů podle základních druhů

Lasery se používají více jak čtyřicet let, za tuto dobu prodělaly mnoho vývojových etap, především v šedesátých letech minulého století, v tomto období se podařilo objevit mnoho různých typů s jedinečnými vlastnostmi laseru, jako například delší vlnová délka v oblasti viditelného světla, vznik infračervené, ultrafialového a samozřejmě rentgenového záření. Každý druh laseru je vhodný pro použití v jiném odvětví, protože specializace každého laseru je velmi úzká. Například pokud budeme chtít laserem svařovat nebo vrtat, budeme potřebovat zařízení s vysokým výkonem, které nám může nabídnout například impulsivní laser. (3)

Lasery rozdělujeme podle:

- a) aktivního prostředí,
- b) vlnové délky,
- c) podle způsobu čerpání energie,
- d) druhu paprsku, resp. režimu paprsku,
- e) výkonu,
- f) konstrukce laserového zařízení,
- g) použití.

a) Dělení laserů podle aktivního prostředí:

Lasery podle tohoto kritéria dělení se liší v závislosti skupenství materiálu, který se používá pro generování záření, myslíme tím tedy skupenství aktivní látky. (3)

- pevné (pevnotátkové) - (rubín, yttrium aluminium granát, skla, keramika),
- plynové - (atomární, molekulové, iontové),
- kapalinové,
- polovodičové (laserové diody),
- plazmatické.

b) Dělení laserů podle vlnové délky generovaného laser. paprsku

- submilimetrové,
- lasery viditelného pásma,
- rentgenové lasery,
- ultrafialové lasery,
- infračervené lasery.

c) Dělení laserů podle způsobu čerpání energie

čerpání energie u laseru probíhá pomocí buzení:

- opticky (výbojkou, jiným laserem, slunečním světlem a radioaktivním zářením),
- elektricky (srážkami v elektrickém výboji, svazkem nabitých částic, injektáží elektronů, interakcí elektromagnetického pole se shluky nabitých částic),
- chemicky (energií chemické vazby, fotochemickou disociací, výměnou energie mezi molekulami a atomy),
- tepelnými změnami (zahřáním a ochlazením plynu),
- jadernou energií – reaktorem, jaderným výbuchem).

d) Dělení laserů podle režimu paprsku

Lasery mohou vykonávat svoji činnost v odlišných časově závislých režimech

- kontinuální režim (continuous wave – CW),
- pulsním režimu (pulsed wave – PW),
- Q režimu (switched – Q_s),

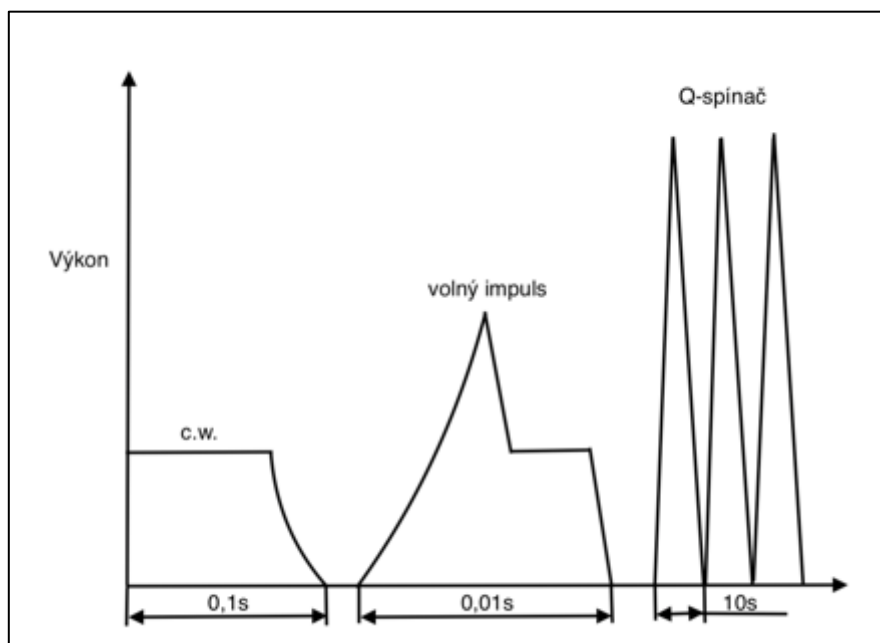
V nepřerušovaném (kontinuálním) pracovním provozu se v drtivé většině uplatňují plynové lasery. U tohoto typu laseru vzniká nepřetržité záření (obr. 1.4) v důsledku neustálého se srážení elektronů. Takto buzené elektrony jsou nejnáze realizovatelné v plynném prostředí, protože k jejímu vyvolání je potřeba relativně malá energie. Při tomto výboji vznikají ionty a elektrony. Volné elektrony přebírají energii zdroje a tu následně distribuují atomům při kolizi. Optimální výkon laseru v nepřerušovaném režimu se pohybuje mezi $(10^4 \div 10^5) W$.

Při potřebě dosažení většího výkonu, použijeme pulsní laser. Ten funguje na principu přerušování budícího elektrického výboje v dutině laseru. Optimální výkon pulsního laseru je určen kolem $(10^{12} - 10^{13}) W$.

Třetí možností, který režim paprsku zvolit je Q switched, ten pracuje výhradně s pevnolátkovým laserem v nepřerušovaném čerpání (řezání, gravírování). Rozsah frekvence, ve které se laser pohybuje, je od desítek do stovek kHz . Pomocí světelného modulátoru ovlivňujeme průběh velikosti a tvaru pulsů. Tato součást je usazena v dutině rezonátoru přímo v cestě laserového paprsku a tento paprsek je přerušovaný. Přerušení může trvat až stamiliontin sekundy. Toto všechno je činěno za jediným záměrem a to, že se okamžitě navýší výstupní výkon a hustota energie. (3)

Použití pulsního a Q režimu umožňuje:

- využít vysokou hustotu pulsu pro zvýšení absorpce záření v materiálu s vysokou odrazivostí,
- snížit TOO (tepelně ovlivněnou oblast),
- provádět řadu vysokorychlostních operací, což má za následek schopnost rychlejšího žíhání a zhasínání světelného svazku.



Obrázek 1.4 – Režimy laserových paprsků

Zdroj: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/4374/brimus_2007_dp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

e) Dělení laserů podle dosahovaného výkonu

- Nízkovýkonové – rozsah výkonu je řádově od desetin až po stovky Wattů (požívá se především pro řezání a vrtání keramiky, rubínů a plastických materiálů),
- Vysokovýkonné – rozsah výkonu od 1 kW až 30 kW (používá se především pro svařování, tepelné zpracování klikových hřídelí a podobně). (3)

f) Dělení laserů podle konstrukce zařízení

Základním konstrukčním prvkem pro návrh laserového zařízení jako celku, je zajištění přesnosti mezi přenosem laserového paprsku a stolem na kterém je uchycen obrobek. (3)

- Systém pevného laseru v kombinaci s pohyblivým stolem, na kterém je umístěn obrobek. Parametry, které nám ovlivňují volbu jsou velikost, tvar, hmotnost.
- Systém pohyblivého laseru s pevným pracovním stolem. Tento systém má velkou výhodu v minimálním omezení tvaru a velikosti obrobku. Nejčastější použití je pro řezání složitých tvarů do rozměrných plechů.
- Systém pevného laseru i pracovního stolu, pohyb paprsku je způsoben nakláněním zrcadel, díky jeho flexibilitě je tento způsob využíván při vysokorychlostním řezání. Nevýhoda toho zařízení je náchylnost na vibrace a

nutnost vysoké přesnosti motorků pohánějící zrcadla, s tím spojená čistota provozu.

Nyní používáme lasery s pomocí řízení CNC systémů, hlava laseru bývá instalována do robotické ruky, která díky sofistikovaných programů řídí proces výroby. V současné době se zdokonaluje technologie přenosu laserového paprsku pomocí optických vláken, s touto inovací bude snadnější kombinovat práci více strojů na jednom obrobku. (3)

g) Dělení laserů podle použití

Použití laserů je velmi rozsáhlé, tudíž nejde vyjmenovat všechny oblasti, kde se používají. Podle použití se rámcově dělí na:

- Technologické,
- Lékařství,
- Metrologii,
- Vojenství.

1.5 Druhy laseru

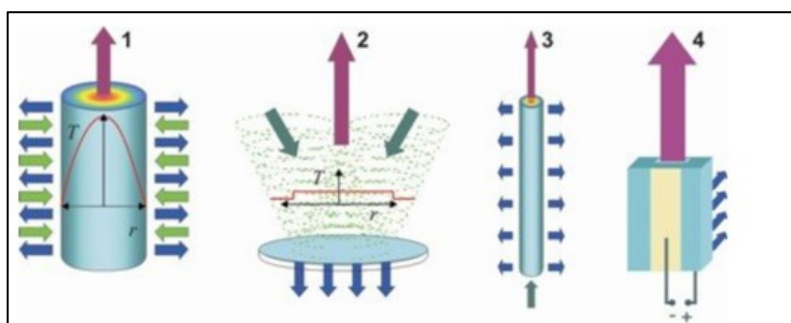
základní rozdělení laserů je podle prostředí, ve kterém vzniká stimulovaná emise.

- plyn (He:Ne, oxid uhličitý),
- kapalina (Rhodamin-barvivo),
- krystal (rubín),
- polovodič,
- molekuly nebo plazma.

1.5.1 Pevnolátkové lasery

Pevnolátkové lasery (obr. 1.5) patří k nejvyužívanějším typům průmyslových laserů v rozsahu výkonu do 10 kW. V poslední době však v této oblasti dochází k objevování lepších materiálů, tudíž se můžeme dočkat zvratu v nasazování dosud běžných typů laserů. Aktivní prostředí této skupiny laserů je tvořeno z krystalických materiálů, které mohou být případně kombinovány s amorfními látkami. Aktivní prostředí je u těchto laserů formováno do tvaru válečku. Nejčastěji používaný typ pevného laseru je

Nd: YAG laser (vyzařování na vlně $1,064 \mu\text{m}$), kde yttrito-hlinitý granát (YAG) je dopován ionty neodymu Nd. Tento typ laseru našel uplatnění především v kombinaci s optickým vláknem, které vede výstupní paprsek a je tak vhodné pro použití v automatizovaném provozu, například pro 3D opracování, svařování, spékání nebo natavování materiálu. Nevýhodou těchto laserů je to, že je potřeba udržovat konstantní teplotu po celou dobu operace. (4, 6)



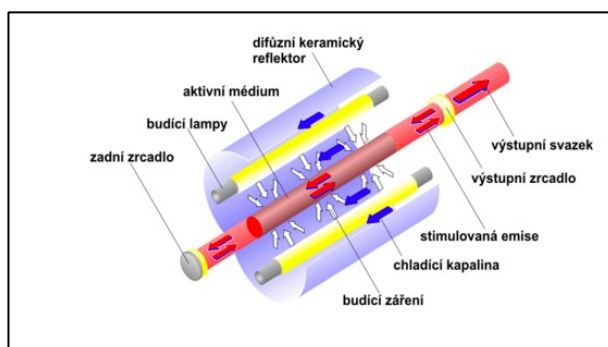
Obrázek 1.5 – Pevnolátkové lasery

Zdroj: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>

Význam šipek: modré – chlazení, zelené – buzení, fialové – svazek laseru. Červeně je zobrazen teplotní profil v aktivním médiu. U diodového laseru je buzení přímým elektrickým proudem (4)

1.5.2 Nd:YAG laser

Jedná se o historicky nejstarší typ (obr. 1.6), který byl nasazen k průmyslovému použití. Nd:YAG laser může být buzen výbojkami (LPSS – lamp pumped solid state) nebo laserovými diodami (DPSS – diode pumped solid state). Běžná účinnost je kolem 2-3 %. Používá se především pro svařování, kde jsou jeho výhody hluboký průvar a malá teplotně ovlivněná oblast. Dále u vrtání do ušlechtilých ocelí a slitin. Vlnová délka laseru je 1064 nm. Mezi hlavní světové výrobce průmyslových Nd:YAG laserů patří firma GSI JK Lasers, Rofin, Lasag aj. (4)

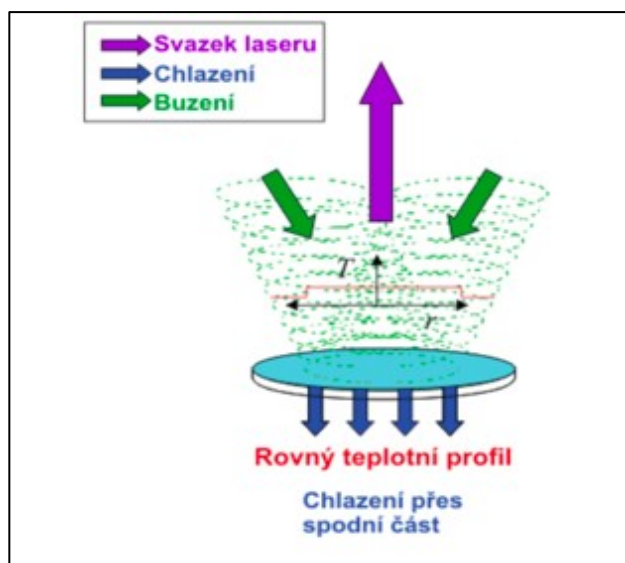


Obrázek 1.6 – Nd:YAG laser

Zdroj: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>

1.5.3 Diskové lasery

Tento druh laseru (obr. 1.7) je vyráběn především firmou Trumpf. Jedná se o moderní technologii. Principiálně se v mnohém neliší od Nd: YAG, ale oproti kruhové tyčinky je zde umístěn kruhový disk. Výhodou je rovnoměrné odvádění tepla, který nám dovoluje dosahovat většího výkonu (max. 16 kW). Používá se především pro náročné operace jako je řezání a svařování kovů. Nevýhodou diskového laseru je nízká účinnost, která se pohybuje okolo 17 % a také celková životnost zařízení. (4, 5)

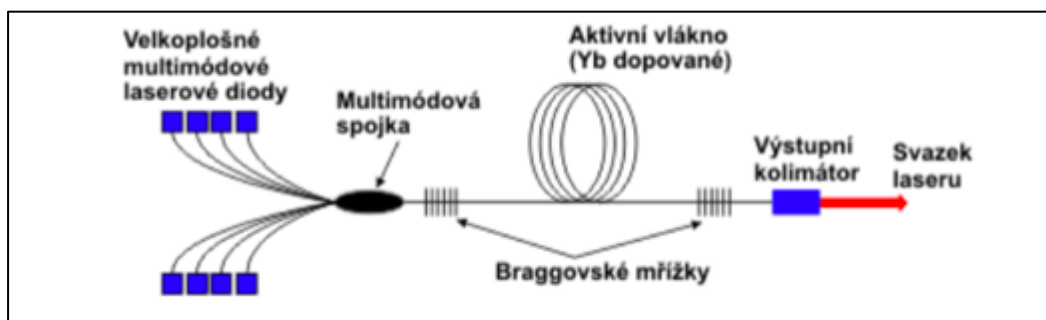


Obrázek 1.7 – Diskový laser

Zdroj: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>

1.5.4 Vláknové lasery

Vláknový laser (obr. 1.8) by měl splňovat dvě zásadní vlastnosti, a to vynikající chlazení a jakost paprsku. Tento typ laseru generuje paprsek v jádru optického vlákna (může být dlouhé až několik metrů) dopovaného prvky lanthanoidů (známé také jako prvky vzácných zemin). Nejčastěji se používá erbia, ytterbia nebo praseodym. Optické vlákno plní stejnou úlohu, jako krystal v pevnolátkových laserech. Velkou výhodou je chlazení, které se odehrává po celé délce vlákna. Další výhodou je to, že není potřeba rezonátor ani speciální čočky, jako u ostatních laserů. Při 100 W jsme schopni vygenerovat intenzitu záření přes $10^9 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Životnost takového zařízení se pohybuje kolem 100 000 hodin. Laser je schopen svařovat hliníkové a ocelové materiály a mikroobrábět. (4, 5)



Obrázek 1.8 – Vláknový laser

Zdroj: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>

1.5.5 Plynové lasery

Takto označené lasery se primárně liší především ve způsobu buzení a jejím prostředí, ve kterém jsou její složky zesíleny. Pracovní prostředí je složena ze směsice atomů odlišných plynů (He-Ne laser, měděný laser, jodový laser). Další možností je vytvoření pomocí molekulárního sloučení (CO₂ laser, CO laser, vodíkový laser, dusíkový laser a excimerový laser). Možnost, jak vytvořit plynový laser, je také za pomoci iontů. Vznikají tím lasery na bázi (Ar laser, Helium-kadmiový laser).

Plynový laser je založen na principu fyzikálního jevu, který říká: „dopadá-li světlo na rozhraní pod Brewsterovým úhlem, potom je-li polarizováno kolmo k rovině dopadu, prochází rozhraním bez odrazu“. Díky tomuto jevu je schopen rezonátor nastavit patřičně zrcadla, aby docházelo k soustředěnému paprsku. Velkou výhodou plynů je to, že jsou více homogenní než pevné látky. Plynový laser je velice perspektivní, protože plyn jsme schopni dle potřeby zvětšovat a zmenšovat, což nám umožňuje plynule dodávat přítok plynu do aktivního prostředí. Existuje mnoho mechanismů, jak dopravit plyn do aktivního prostředí. Plynové lasery mají účinnost kolem 40 %. Nevýhodou plynových laserů je poměrně malá objemová hustota počtu částí, tato vlastnost se následně odráží ve sníženém objemovém výkonu. (4, 5)

Plynové lasery se dají dělit dle využití v průmyslových aplikacích na:

- Atomární – He-Ne jako justážní a pilotní laser,
- Iontové – Ar₂₊ laserová litografie,
- Molekulové – CO₂ makro zpracování materiálů, excimetry.

1.5.6 Helium-neonový laser

Aktivní prostředí tvoří atomy prvků Neonu a směsi Helia. Poměr těchto složek je tvořen $\text{He:Ne} = 5 \text{ až } 15 : 1$. Takto vytvořená směs dosahuje maximálního tlaku 300 Pa . Nejvíce používaná vlnová délka je $\lambda = 632,8 \text{ nm}$. Takto nastavený paprsek má velmi malou rozbíhavost. Používá se především k funkcím u přesných hodin, dále u dálkoměrů a k telekomunikačním a geodetickým účelům. (6)

1.5.7 Argonový laser

Aktivní prostředí je tvořeno směsicí iontů argonu, buzení probíhá pomocí elektrických výbojů. Máme možnost použít 9 různých vlnových délek. Záření se projevuje zelenou barvou. Výkon tohoto typu laseru je od 15 mW do 50 W , záleží na konstrukčním řešení, pokud se chceme dostat na maximální hodnotu, budeme požadovat chlazení vodou a výbojovou trubicí vyrobenou z keramiky. Argonový laser používáme především v medicíně (operace oka) a průmyslu (lithografie). (6)

1.5.8 CO₂ Laser

Aktivní prostředí je zde tvořeno molekulami oxidu uhličitého ve směsi dusíku a helia v poměru $\text{CO}_2 : \text{N} : \text{He} = 1 : 2 : 8$. Buzení je prováděno pomocí elektrických výbojů nebo HF proudy. (6)

CO₂ laser se dá podle konstrukčního hlediska rozdělit na:

- **Podélné proudění (fast axial flow):** Výkon od 10 W do 20 kW , vhodné pro řezání
- **Příčné proudění (cross flow):** Výkon od 10 W do 10 kW , vhodné pro svařování, povlakování a tepelné zpracování materiálů. tento typ laseru má výrazně nižší provozní náklady, než laser s podélným prouděním
- **SLAB laser (table):** Výkon od 1 kW do $2,5 \text{ kW}$. Nejpoužívanější a nejnovější typ průmyslově používaného laseru z řady CO₂, laser obsahuje zásobník o velikosti 10 litrů plynu, což vystačí na 12 měsíců nepřetržitého provozu. Chlazení je zajištěno pomocí difuze. Buzení je radiofrekvenčně DC CO₂.

1.6 Průmyslová aplikace laseru

Lasery jsou díky své univerzálnosti používány v širokém spektru aplikací, některé si níže uvedeme.

1.6.1 Laserové řezání

Nejčastější aplikace laseru je na dělení kovového materiálu, používá se zde zejména díky své vysoké řezné rychlosti až 15 m/min . Velkou výhodou řezání pomocí laseru je velmi malá tepelně ovlivněná oblast, převážně se používá pro dělení plechů nad 3 mm . Řezání laserem se dělí podle používaného plynu na oxidační řezání, tavné řezání, sublimační řezání, plazmové řezání, (6, 7)

1.6.2 Laserové svařování

Laser je velmi populární pro svařování v automatizované a velkosériové výrobě. Výhody laserového svařování jsou podobné jako u řezání, nízká tepelně ovlivněná oblast, garantována štíhlost sváru, malý rozstřík a nízký výskyt tepelných deformací. Svařování probíhá bez přídavného materiálu. Nevýhody jsou vysoké pořizovací náklady, použití náročných přípravků a servisní požadavky. (6, 7)

1.6.3 Vrtání laserem

Využívá se zejména pro vrtání do těžkoobrobitelných materiálů (např. diamant) nebo pro vrtání s velkým poměrem délky k průměru. Za tímto účelem je používán pulsní pevnolátkový laser nebo CO_2 laser.

1.6.4 Laserové mikroobrábění

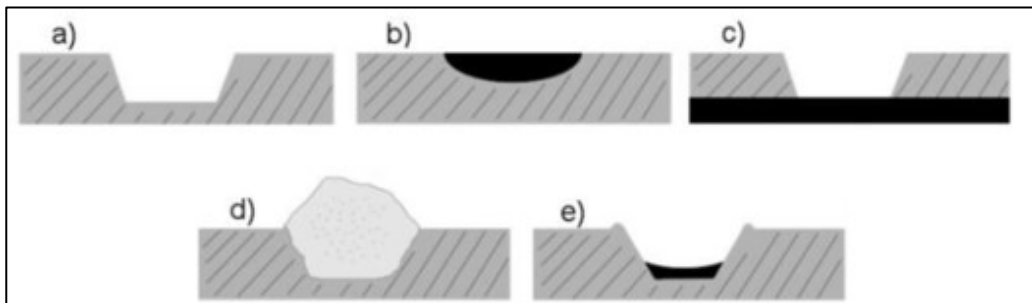
Laserové mikroobrábění je velmi podobné gravírování. Liší se především v přesnosti odebírané plochy, u mikroobrábění jsme schopni vytvořit díru o průměru $1\text{ }\mu\text{m}$ a to i nekruhových průměrů. U mikroobrábění nám tolik nejde o estetický vzhled povrchu, ale především o přesnost. Materiál, který se takto obrábí, jsou především kovy, plasty, sklo a keramika. (8)

1.7 Laserové gravírování a popisování

Laser jako průmyslový značkovač začal postupně nahrazovat například razítka, lakové tužky, raznice nebo vysokootáčkové frézy. Vyniká především svojí univerzálností, rychlostí a přesností. Neměli bychom zapomínat ani na odolnost vůči mechanickým vjemům. Nevýhodou jsou náklady na nákup a následný provoz zařízení. (1)

1.7.1 Způsoby gravírování

Možnosti, jak na materiál vytvořit námi požadovanou stopu je více (obr. 1.9). Vliv na to má vysoký počet různých druhů laserů, kombinací základních parametrů a způsobu gravírování.



Obrázek 1.9 – Způsoby gravírování

Zdroj: http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24662/hub%C3%ADk_2013_bp.pdf?sequence=1&isAllowed=y

a) Vyjmutí materiálu

Tato metoda spočívá ve vypálení části materiálu, čímž vznikne na povrchu viditelný reliéf. Pomocí nastavení pracovních parametrů laseru můžeme ovlivňovat šířku i hloubku odstraňované vrstvy. Používá se na všechny druhy materiálu.

b) Barevná odlišnost (karbonizace)

Laserový paprsek při dopadu na materiál mění svou kinetickou energii na tepelnou a v důsledku této reakce dochází ke karbonizaci povrchu. Následkem je změna barvy materiálu. Barva může být černá nebo hnědá, podle intenzity paprsku.

c) Odebrání určité vrstvy

Při této metodě se snažíme odebírat pouze minimum materiálu. Používá se například u značení plastových tlačítek klávesnice.

d) Zpěnění (sublimace)

Tato metoda je možná použít pouze u plastových materiálu. Při zahřátí povrchu laserovým paprskem dochází k uvolňování plynů z materiálu. Tyto plyny, které obalí roztavený plastový materiál vytvoří na povrchu zdrsňenou strukturu připomínající puchýřky.

e) Odebírání a změna barvy materiálu

tato metoda kombinuje již zmíněný způsob gravírování a) a b). (1)

2 VYUŽITÍ LASEROVÉHO GRAVÍROVÁNÍ PŘI ZNAČENÍ

2.1 Laser E4060

Pro praktickou část bylo využito laserové zařízení E4060. Laserové zařízení E4060 je vybavený CO₂ trubicí, díky ní je možné používat zařízení pro gravírování do plastů, dřeva, lepenky, kůže, skla, keramiky, plexiskla. Při nutnosti gravírování do kovového materiálu je potřeba použít speciální pastu, kterou se povrch materiálu potře. Pomocí krokového motoru je výškové nastavení stolu v rozsahu od 0–280 mm. Paprsek je přiváděn na obráběnou plochu pomocí tří odrazových zrcátek a speciální čočky. Pro nastavení kolmosti paprsku je přidáno seřizovací zrcátko. (9)

Tabulka 2.1 – Technické parametry laseru E4060 ⁹

| Technický parametr | Hodnota |
|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Min. rozměry gravírované plochy | 1,5 × 1.5 mm |
| Max. rozměry gravírované plochy | 400 × 600 mm |
| Možnost gravírování rotačních těles | ano |
| Výkon laseru | 40 W |
| Typ laseru | CO ₂ |
| Životnost laserové trubice | 4000 hod. |
| Rychlost gravírování | 0–1000 mm·s ⁻¹ |
| Řezná rychlost | 0–600 mm·s ⁻¹ |
| Max. hloubka řezu | Akryl 0–10 mm |
| Pohony os | krokové motory |
| Opakovatelná přesnost | 0.01 mm |
| Chlazení vodou | ano |
| Podporovaný software | ArtCut, CorelDraw, PhotoShop, AutoCAD |
| Podporované grafické formáty | PLT, DXF, BMP, JPG, GIF, PGN, TIF |
| Komunikační rozhraní | USB |
| Celkový příkon | 1200 W |
| Elektrické připojení | 230 V |
| Pracovní výška | 0–280 mm |
| Rozměry | 1370 × 950 × 1050 mm |



Obrázek 2.1 – Laser E4060

Zdroj: <https://www.svarecky-obchod.cz/kovoobrabeci-stroje/cnc-lasery/29271-gravirovací-a-rezací-co2-laser-e-4060.htm>

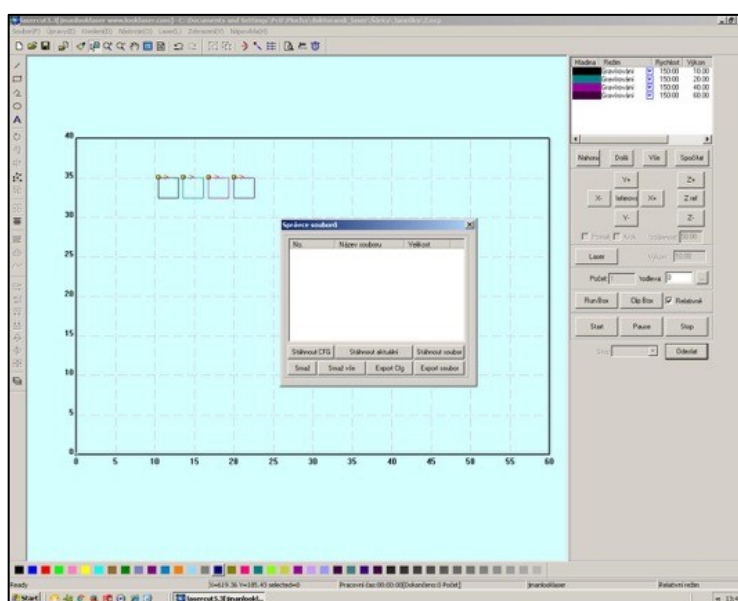
2.2 Pracovní postup na laserovém zařízení

Při práci na laseru E4060 je vhodné dodržovat následující sled operací:

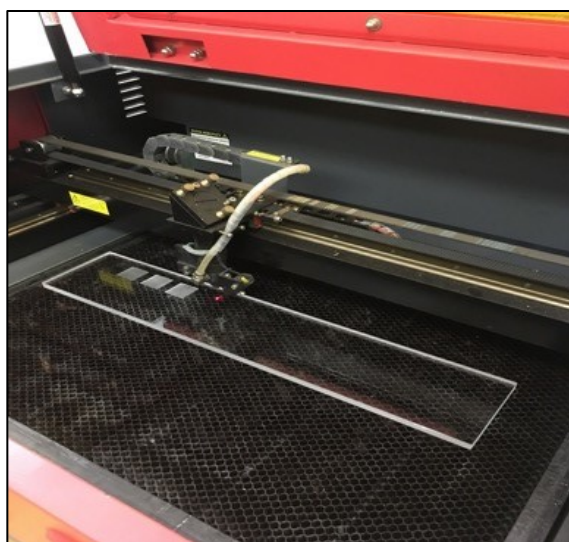
1. Zapnutí zařízení hlavním vypínačem.
2. Zapnutí externího počítače.
3. Umístění souboru (PLT, DXF, BMP, JPG, GIF, PGN, TIF) do softwaru.
4. Nastavení správné ohniskové vzdálenosti.
5. Nastavení výkonu, rychlosti a dalších parametrů.
6. Případná grafická úprava modelu v softwaru LaserCut.
7. Odeslání souboru do zařízení E4060.
8. Zapnutí odsávání zplodin.
9. Zapnutí chlazení.
10. Vložení materiálu na pracovní plochu.
11. Aktivace laseru tlačítkem.
12. dělení / gravírování materiálu.
13. Vypnutí laseru.
14. Vypnutí odsávání zplodin.
15. Vypnutí chlazení.
16. Vizuální kontrola, kontrola kvalitu řezu.
17. Vypnutí hlavního vypínače.

2.3 Příprava pracovního souboru

Pro přípravu pracovního souboru byl použit program LaserCut 5.3 (obrázek 2.2), tento program pracuje se soubory ve formátu PLT, DXF, BMP, JPG, GIF, PGN, TIF. Požadovaný obrázek se zobrazí v pracovním prostředí, kde pomocí hladin můžeme každý jednotlivý segment označit a přiřadit mu konkrétní parametry, se kterými bude laser pracovat. V našem případě jsme si každý čtverec označili jinou hladinou s rozsahem výkonu od (10–60) % a posuvovou rychlostí (150–300) mm·s⁻¹. Pomocí tlačítka odeslat jej pošleme do laserového zařízení, kde bude následovat gravírovací proces (obrázek 2.3)



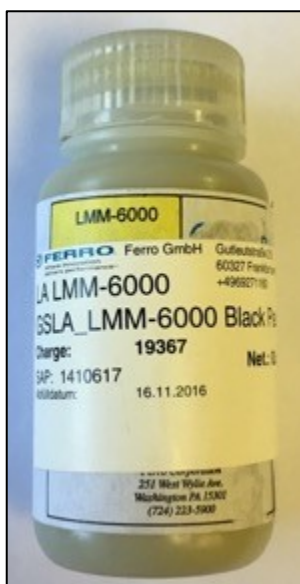
Obrázek 2.2 – Pracovní prostředí Lasercut 5.3



Obrázek 2.3 – Pracovní plocha Laseru

2.4 Pasta LMM 6000

Pasta LMM 6000 (obrázek 2.4) je určena k univerzálnímu použití, doporučuje se k vytvoření černého značení na různých kovech. Díky svému složení vytváří pasta po uschnutí tvrdou vrstvu, které je možno se před značením dotknout. Tuto vlastnost můžeme využít u značení více kusů, kdy si materiály natřeme dopředu a následně je můžeme uskladnit. Takto natřený materiál je možno na sebe naskládat, aniž by došlo k otěru. Doporučený poměr pasty: 1:4 (1 díl LMM 6000 a 4 díly denaturovaného alkoholu). (10)



Obrázek 2.4 – Pasta LMM 6000 černé barvy

2.5 Materiály

Při kontaktu laserového paprsku s materiálem dochází k vzájemné interakci. Tento proces je závislý na vlastnostech daného materiálu, na schopnosti odrazet laserový paprsek a schopnosti jej pohlcovat. Vlastnosti, které jsou nutné pro zpracování laserovým zařízením:

- odrazivost
- pohlcování
- tepelná vodivost
- tavení povrchové vrstvy
- odpařování

Pro experiment gravírování při značení vzorků bylo použito různých materiálů. Vybráno bylo 5 odlišných materiálů:

- ocel ČSN 11 373,

- slitina hliníku EN AW 7075,
- plexisklo XT,
- překližka,
- lepenka.

Každý materiál byl před samotným gravírováním očištěn a odmaštěn. Kovový materiál byl navíc potřen speciální pastou LMM 6000 černé barvy, která má docílit lepšího označení vzorku. Cílem experimentu bylo najít ideální nastavení laseru pro značení těchto materiálů. V tabulce 2.2 jsou uvedeny technické parametry pro jednotlivé materiály.

Tabulka 2.2 – Technické parametry

| Materiál | ocel ČSN 11 373 | slitina hliníku EN AW 7075 | plexisklo XT | překližka | lepenka |
|--|--------------------|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Výkon [%] | 10, 20, 40, 60 | 10, 20, 40, 60 | 10, 20, 40, 60 | 10, 20, 40, 60 | 10, 20, 40, 60 |
| Posuvová rychlost [mm·s ⁻¹] | 150 | 150 | 200, 300 | 200, 300 | 200, 300 |

2.5.1 Ocel ČSN 11 373

Neušlechtilá konstrukční ocel (obrázek 2.5) obvyklé jakosti vhodná ke svařování. Součásti konstrukcí a strojů menších tlouštěk, i tavně svařované, namáhané staticky i mírně dynamicky. Ocel lze použít na vtokové objekty vodních turbín, výtoky, hradidlové tabule, stavidla, méně namáhaná svařovaná potrubí a odbočnice, jezové konstrukce. Vhodná ke svařování. (11)

Ekvivalenty k ČSN normě jsou oceli nesoucí označení EN 10027-1, EN 10025:90, DIN USt37-2. (19)

Tabulka 2.3 – Chemické složení [hm. %] ¹⁶

| C | P | S | N |
|------|-------|-------|-------|
| 0,17 | 0,045 | 0,045 | 0,007 |

Tabulka 2.4 – Mechanické vlastnosti ¹⁶

| Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Tažnost [%] | Nárazová práce [J] |
|--------------------|-----------------------|----------------|-----------------------|
| 235 | 340–470 | 26 | 27 |



Obrázek 2.5 – Ocel ČSN 11 373

2.5.2 Slitina hliníku EN AW 7075

Materiál je odolný s dobrou pevností a průměrnou obrobitelností. Obtížně svařitelný. Na rozdíl od ostatních slitin je méně odolný proti korozi. Obvykle vyráběn ve více tvrdostech. Materiál se používá ve vysoce namáhaných strojních součástech a v obranném průmyslu. (12)

Tabulka 2.5 – Chemické složení [hm. %]¹⁷

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti |
|-----|-----|-------|-----|-------|------|-----|-----|
| 0,4 | 0,5 | 1,2–2 | 0,3 | 2–2,1 | 0,18 | 5,1 | 0,2 |

Tabulka 2.6 – Mechanické vlastnosti¹⁷

| Mez kluzu [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Tažnost [%] |
|--------------------|-----------------------|----------------|
| 460 | 540 | 8 |



Obrázek 2.6 – Slitina hliníku EN AW 7075

2.5.3 Plexisklo XT

Plexisklo se vyznačuje výbornou transparentností a lesklým povrchem. Toto plexisklo je opatřeno UV ochrannými filtry. Extrudované plexisklo je odolné proti povětrnostním vlivům, má výbornou propustnost světla, velmi snadno se recykluje. Plexisklo se dá využít jak v exteriéru, tak interiéru. Používá se na osvětlovací techniku, reklamní nápisy a cedule, výklady, stojany grafických panelů, kryty strojů a zařízení, prosklení dveří a mnoho dalšího. (13)

Přesné chemické složení není veřejně dostupné z důvodu ochrany proti zneužití.

Tabulka 2.7 – Mechanické vlastnosti ¹⁸

| Modul pružnosti [MPa] | Mez pevnosti [MPa] | Tažnost [%] | Propustnost světla [%] |
|--------------------------|-----------------------|----------------|---------------------------|
| 3200 | 72 | 5,5 | 92 |



Obrázek 2.7 – Plexisklo XT

2.5.4 Překližka

Překližka je kompozitní deska, vyrobená ze tří nebo více vrstev loupaných nebo krájených dýh. Jednotlivé dýhy jsou na sebe lepeny křížem. Počet dýh je většinou lichý, ale může být sudý, když se dají dvě podélné nebo příčné dýhy na sebe. Oproti rostlému dřevu mají lepší rozměrovou a tvarovou stálost. Lze je zpracovávat běžnými dřevoobráběcími nástroji a stroji, jako masivní dřevo. (14)



Obrázek 2.8 – Překližka

2.5.5 Lepenka

Lepenka je silný papír o plošné váze nad 250 g/m^2 . Lepenka se vyrábí slisováním několika vrstev o stejné tloušťce za mokra. V běžné mluvě i obchodním styku je často lepenka nazývána jako karton, což není pravda, karton má výrazně menší gramáž. Lepenka se využívá především jako obalový materiál, pro výrobu knižních desek, pořadačů, diářů, pasů a podobně. (15)

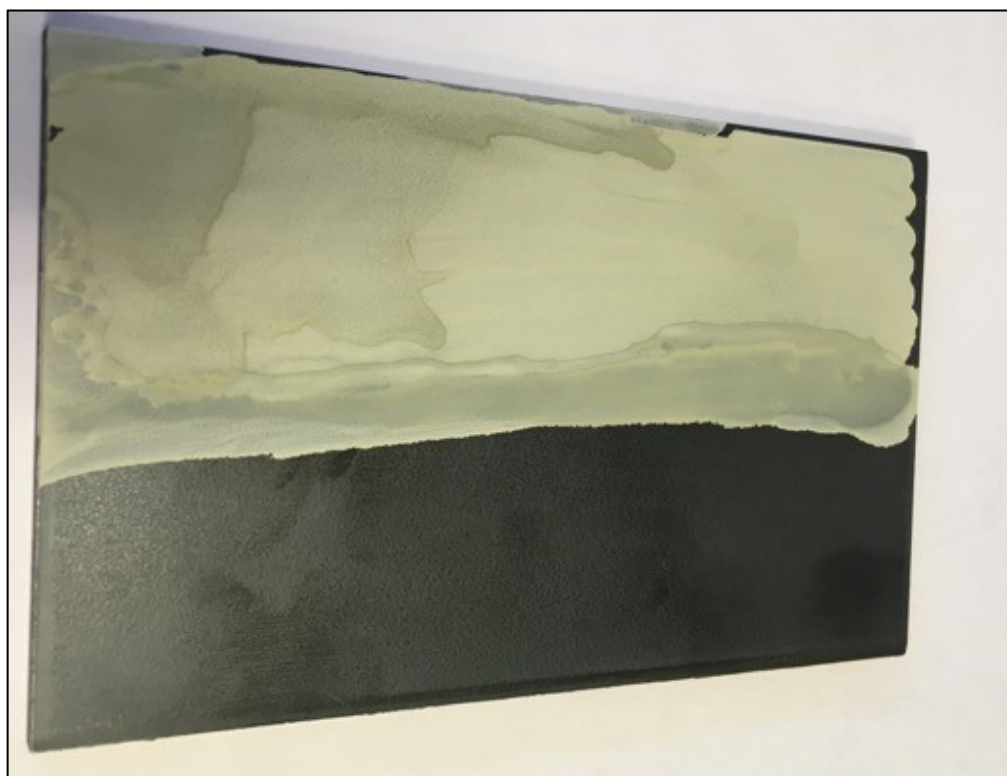


Obrázek 2.9 – Lepenka

3 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

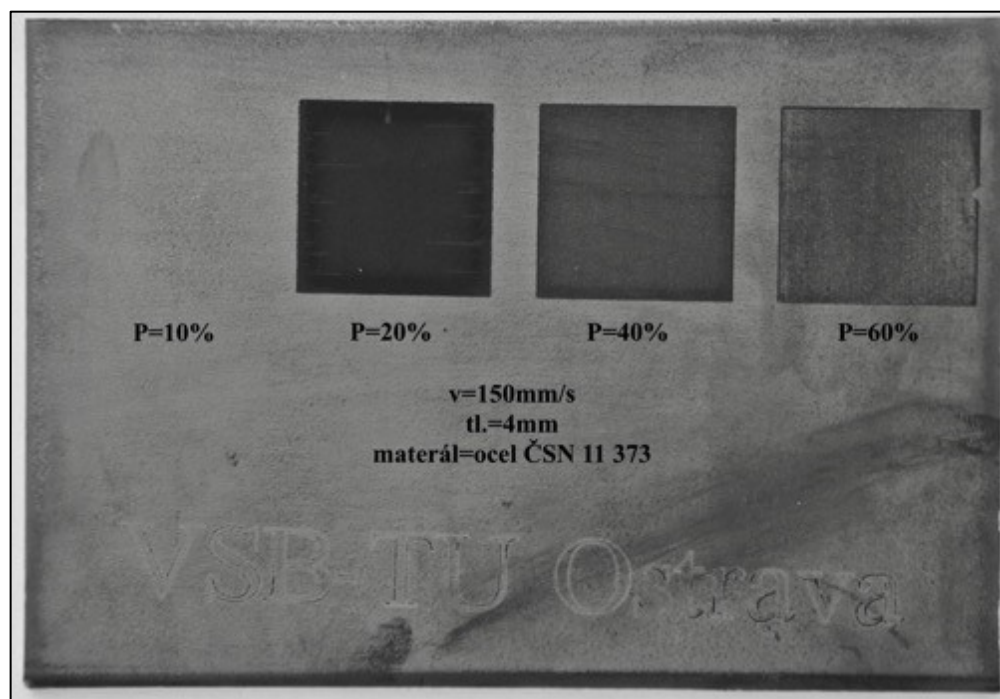
3.1 Ocel ČSN 11 373

Ocelový vzorek o tloušťce 4 mm. Povrch byl po zbavení korozních produktů a odmaštění potřen pastou LMM 6000 (obrázek 3.1), která má vytvořit na povrchu tenký film. Po zaschnutí je povrch připraven pro zpracování laserem.



Obrázek 3.1 – Aplikace pasty LMM 6000 na ocel 11 373

Nanesení pasty LMM 6000 (obrázek 3.1) není nikterak složité, ale je zapotřebí aplikovat pastu v tenké vrstvě, případně nanést více vrstev, které budou rovnoměrně rozetřeny po celém povrchu vzorku. Jen takto je možno docílit ideálního výsledku, který je garantovaný výrobcem. Pokud nedojde k optimálnímu nanesení je potřeba za pomoci čistících a odmašťovacích prostředků pastu odstranit a následně povrch nechat dokonale uschnout a aplikaci opakovat.

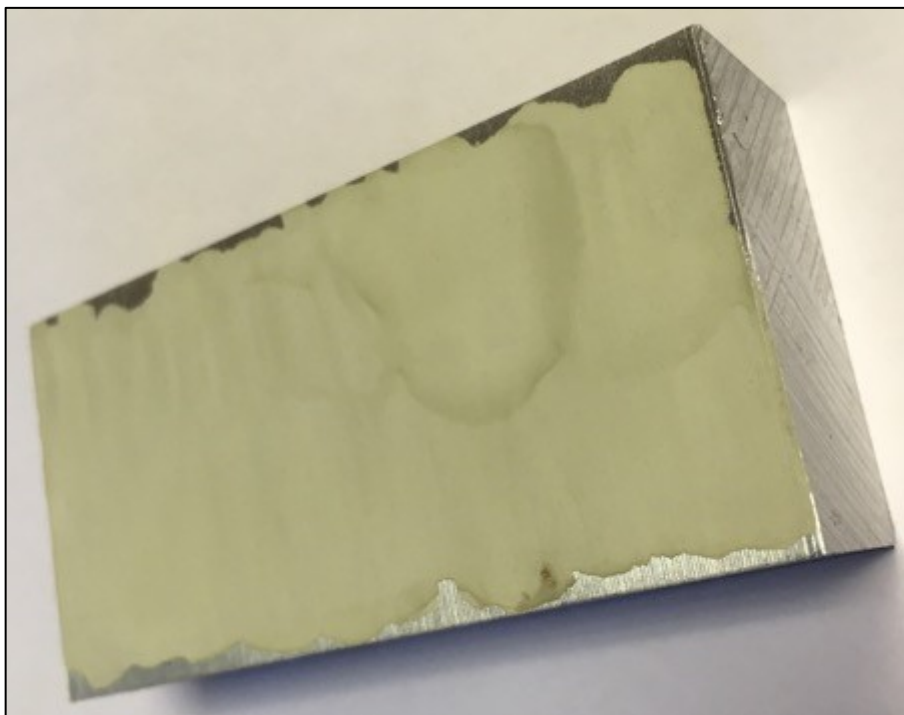


Obrázek 3.2 – Značení vzorku ocel 11 373

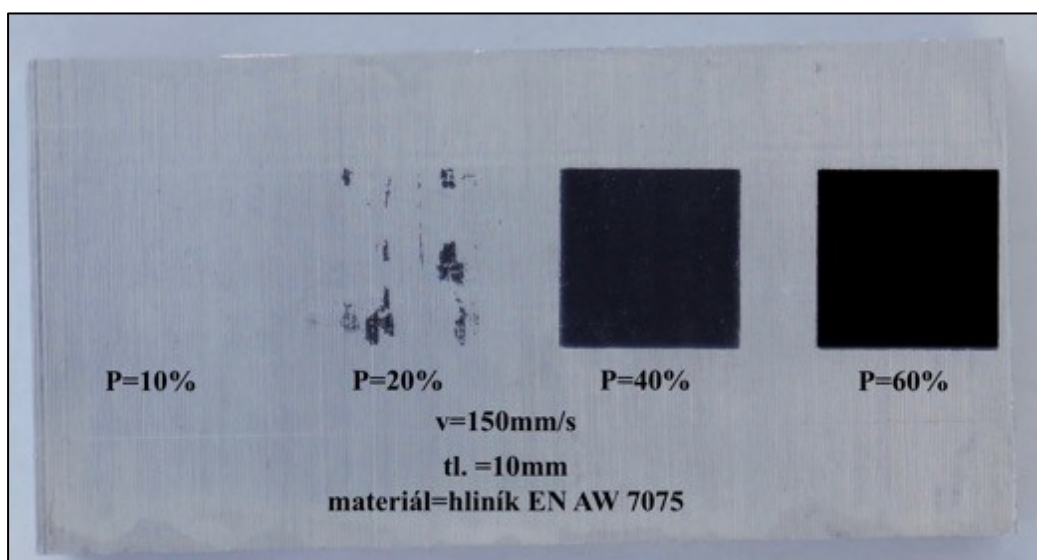
Na vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimální technické parametry (Obrázek 3.2) byly zvoleny: výkon 40 %, posuvová rychlost $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Takto nastavený laser zanechal na povrchu materiálu ideální stopu. Vyniká výrazným barevným kontrastem spolu s uspokojivou odolností proti otěru. Výkon laseru 10 % nezanechal na povrchu žádnou stopu. Výkon laseru 20 % zanechal na povrchu materiálu nejlepší barevnou stopu, která má ovšem velmi nízkou odolnost vůči otěru. Pasta se zde nedokázala dostatečně připéct, a tudíž toto nastavení není vhodné do provozu, kde se setkáváme s častým otíráním materiálů. Výkon laseru 60 % zanechal na povrchu materiálu velmi slabou stopu. Barevný kontrast je v tomto případě příliš slabý. Odolnost vůči otěru je zde nejhorší. Na vzorku bylo vyzkoušeno označení textového formátu bez použití speciální pasty. Tento experiment nedopadl příliš uspokojivě, protože laserové zařízení není dostatečně výkonné, aby dokázalo zanechat stopu na kovovém materiálu. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 10,3 minuty.

3.2 Slitina hliníku EN AW 7075

Hliníkový vzorek o tloušťce 10 mm. Povrch byl stejně jako u ocelového vzorku zbaven korozních produktů, odmaštěn a potřen pastou LMM 6000 (Obrázek 3.3).



Obrázek 3.3 – Aplikace pasty LMM 6000 na hliníkový vzorek opravdu



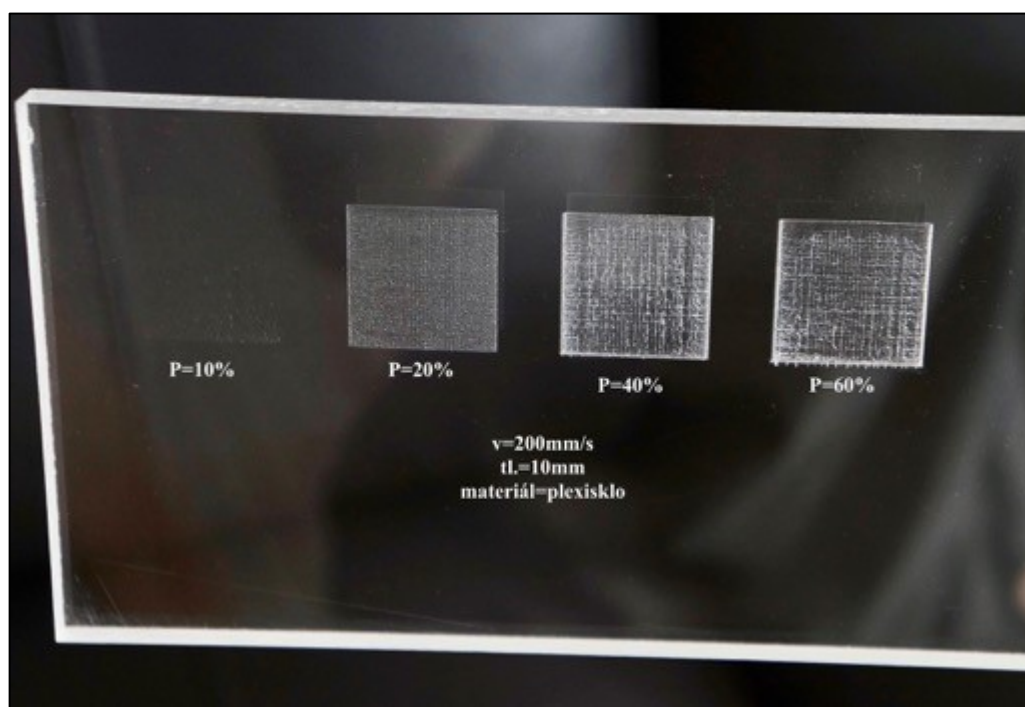
Obrázek 3.4 – Značení vzorku hliník EN AW 7075

Na vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimální technické parametry (Obrázek 3.4) byly zvoleny: výkon 60 %, posuvová rychlost $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Takto nastavený laser zanechal na povrchu materiálu

ideální stopu. Označení je velmi kvalitní, vyniká barevnou sytostí, výrazným kontrastem a nulovým opalem či jinými nedostatky. Odolnost vůči mechanickému opotřebení je velmi dobrá. Výkon laseru 10 % nezanechal na povrchu žádnou stopu. Výkon laseru 20 % zanechal na povrchu jen nepatrnou stopu. Pokud bychom měli k dispozici laser pouze s tímto výkonem, můžeme snížit posuvovou rychlost, tím bychom měli docílit lepších výsledků. Při výkonu laseru 40 % bylo dosaženo také velmi kvalitního označení. Barevný kontrast je uspokojivý, odolnost proti mechanickému opotřebení je také velmi dobrá. Vzorek vykazuje horší sytost barvy a větší počet nedokonalostí u okrajů značené plochy, než je tomu u značené plochy s výkonem 60 %. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $150 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 4 minuty.

3.3 Plexisklo XT

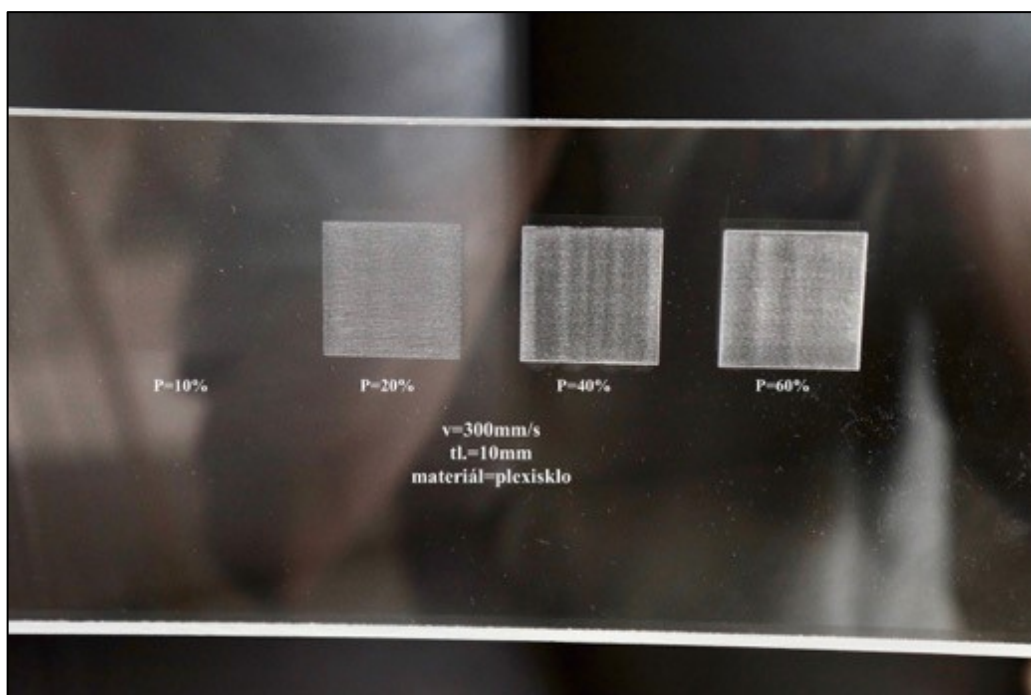
Vzorek plexiskla má tloušťku 10 mm. Plexisklo bylo před experimentem očištěno a odmaštěno.



Obrázek 3.5 – Značení 1. vzorku Plexisklo XT

Na 1. vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimální technické parametry (Obrázek 3.5) byly zvoleny: výkon 20 %, posuvová rychlost $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, toto nastavení vykazuje nejlepší povrch gravírované plochy. Při tomto výkonu laseru je gravírovaný povrch jemný, a po

celé jeho ploše konzistentní. Jak je vidět na obrázku 3.5, kontrast mezi lesklým povrchem plexiskla a vygravírovaným vzorkem je dobře viditelný i při pouhých 20 % výkonu. Výrobce tohoto plexiskla zaručuje dobrou obrobitelnost laserem. S výkonem 10 % je vygravírovaná část velmi málo vidět, tento výkon tedy není vhodný pro jakékoliv použití. Při výkonu laseru 40 % je vygravírovaný povrch značně zdeformovaný a po krajích se plexisklo jemně odlupuje. Při výkonu 60 % se vytvoří povrch značně drsný, tvoří se stopy na okrajích po průjezdu laserového paprsku. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 8 minut.



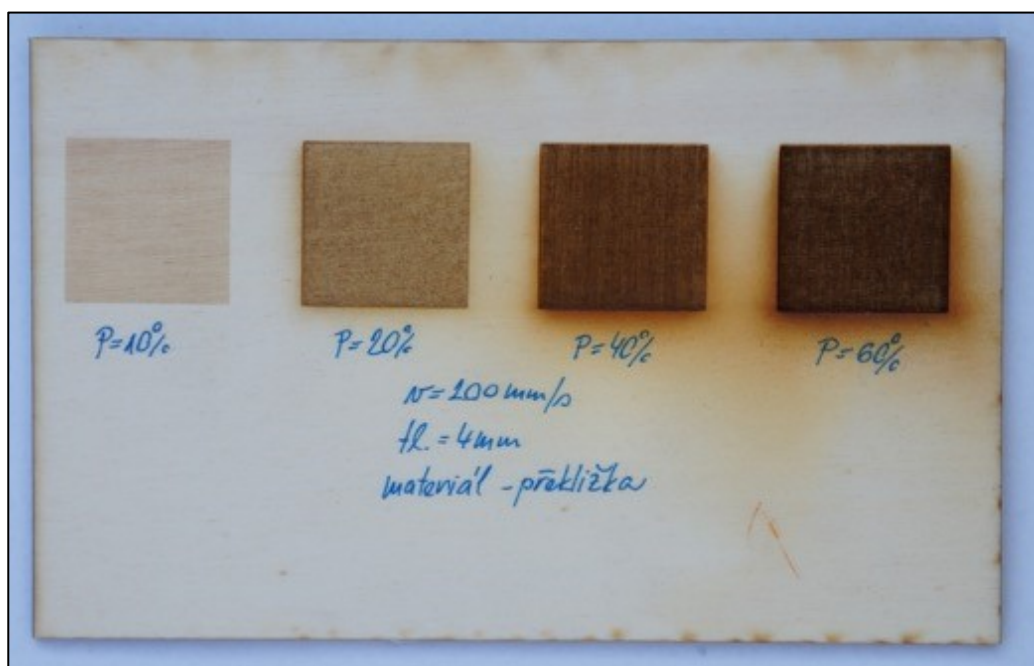
Obrázek 3.6 – Značení 2. vzorku Plexisklo XT

Na 2. vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimální technické parametry byly zvoleny: výkon 40 %, posuvová rychlost $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, toto nastavení vykazuje nejlepší povrch gravírované plochy. Při tomto výkonu laseru je povrch dostatečně kontrastní proti lesklému povrchu plexiskla. Gravírovaný povrch je dostatečně hluboko, tudíž bude odolný proti mechanickému opotřebení. Drsnost povrchu je přijatelná, nijak to nenarušuje estetický dojem, vhodné pro značení reklamních materiálů. Díky nízkému výkonu a vysoké posuvové rychlosti je práce při těchto technických parametrech velice efektivní. S výkonem 10 % se nedosáhlo takřka žádného označení, jak je patrné na obrázku 3.6. Při výkonu 20 % je vygravírovaný povrch kontrastní vůči jeho okolí, ale při této posuvové

rychlosti jsou na testovaném povrchu vidět malé plošky, které nejsou obrobené. Toto je způsobeno vysokou posuvovou rychlostí a malým výkonem laseru. Paprsek v tomto případě neměl dostatečný čas vypálit celou plochu plexiskla. V případě, kdy použijeme výkon laseru 60 % a posuvovou rychlost $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, dostaneme povrch, který je velice drsný, hluboko v tloušťce plexiskla a s okraji, které nesou stopy po průjezdu laserového paprsku. Toto je zapříčiněno velkým úběrem materiálu, ke kterému dochází při navyšování výkonu laserového zařízení. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 5,8 minuty.

3.4 Překližka

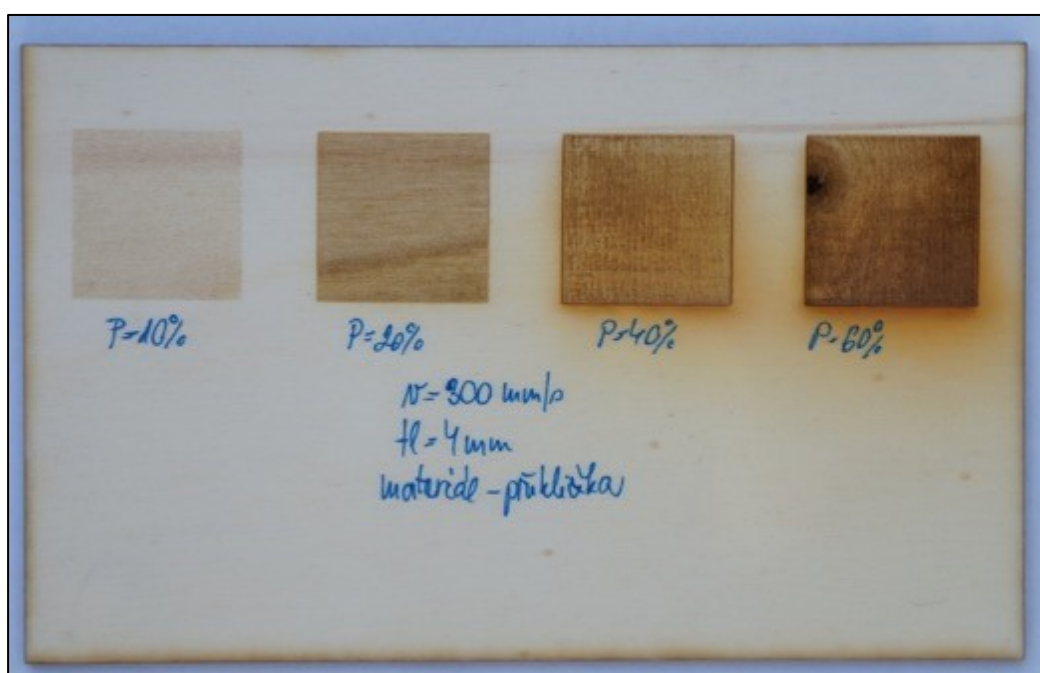
Experiment byl proveden na dvou vzorcích překližky při odlišných posuvových rychlostech $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ a $300 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. První vzorek překližky má tloušťku 4 mm. Překližka byla očištěna, zbavená pilin pomocí kartáče.



Obrázek 3.7 – Značení 1. vzorku překližky

Na 1. vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Navržené technické parametry byly zvoleny: výkon 10 %, posuvová rychlost $200 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, toto nastavení vykazuje nejlepší povrch gravírované plochy. Při tomto výkonu laseru je povrch dostatečně kontrastní vůči svému okolí a nedochází k velkému úbytku materiálu. Povrch není nijak degradovaný, vygravírovaná část nepřesahuje předem daný prostor. Nedochází k žádnému opalu. Při výkonu laseru na

20 % je povrch tmavší, což hodnotíme kladně, ale vygravírovaný vzor prostoupil hodně hluboko a dochází k lehkému opalování okrajů. Toto je způsobené velkým uvolňováním tepla laserového paprsku. Řešením je snížit výkon laseru nebo zvolit vyšší hodnotu posuvové rychlosti. Při výkonu laseru na 40 % došlo k vygravírování plochy ještě hlouběji, povrch je tmavě hnědý a nese známky velké degradace. Při použití laseru na 60 % došlo téměř k propálení poslední desky překližky. Povrch je velmi drsný. Okraje nesou široké stopy opalu, což není z estetického hlediska přínosné, tudíž toto nastavení technických parametrů není vhodné. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 8 minut.



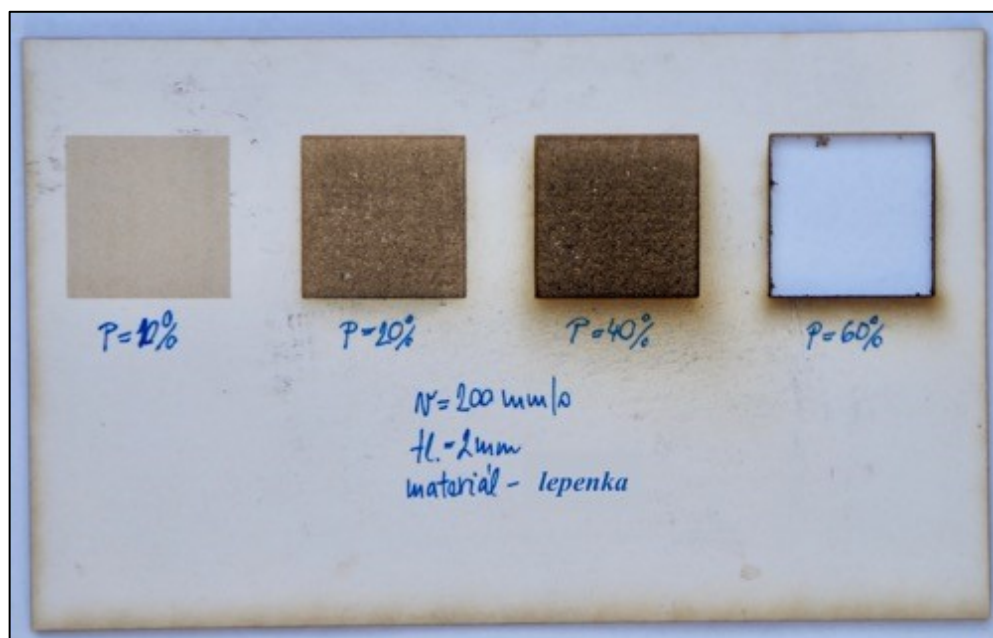
Obrázek 3.8 – Značení 2. vzorku překližky

Na 2. vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Obecně se dá říct, že všechny výsledky druhého vzorku jsou lepší při použití shodných hodnot výkonu, než je tomu u prvního vzorku. Optimální technické parametry byly zvoleny: výkon 20 %, posuvová rychlost $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, toto nastavení vykazuje nejlepší povrch gravírované plochy. Při tomto nastavení technických parametrů se povrch jeví velmi kvalitně, kontrast mezi okolím je dostatečně silný. Hloubka vygravírované plochy je nepatrná, okraje jsou ostré bez opalu. V porovnání s prvním vzorkem se toto nastavení laseru jeví jako nejlepší. Díky vyšší posuvové rychlosti jsme schopni dosáhnout ekonomicky lepších výsledků. Výkon 10 % nevytvoří

dostatečně velký barevný kontrast, který by byl odlišný od okolí, barevná sytost není stálá, záleží hodně na podkladu. Při nastavení výkonu na 40 % dochází ke značnému opalu okrajů, povrch vygravírované plochy je drsný. Při výkonu 60 % došlo téměř k propálení poslední vrstvy překližky. Okraje jsou viditelně opálené. Povrch označené plochy je velmi drsný. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 5,8 minuty.

3.5 Lepenka

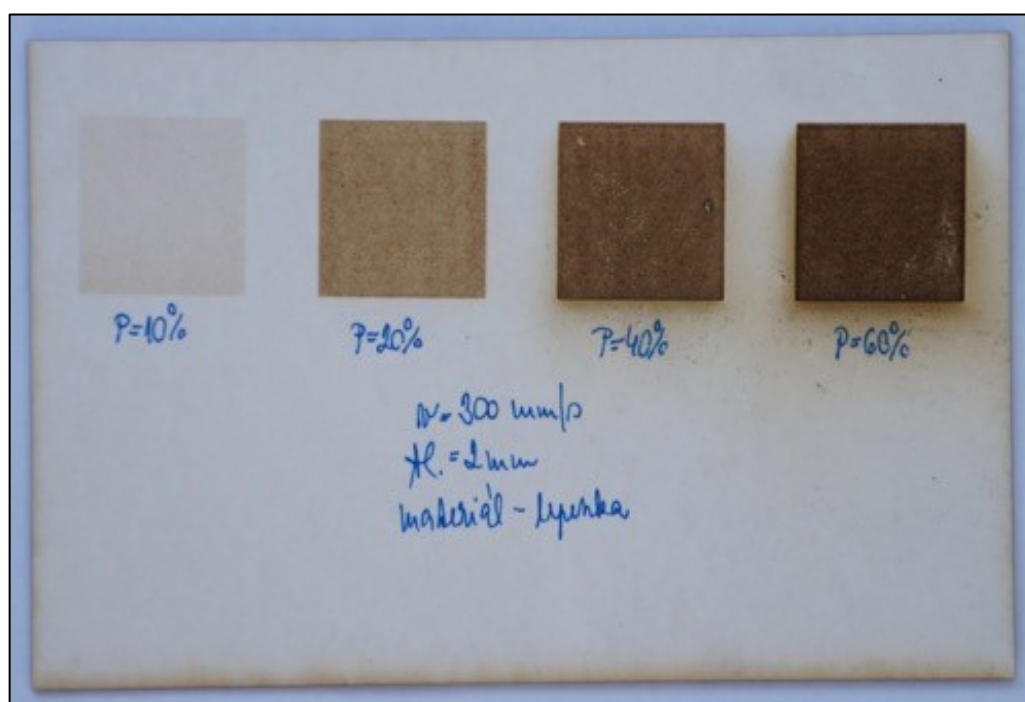
Experiment byl proveden na dvou vzorcích lepenky při odlišných posuvových rychlostech $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ a $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. První vzorek lepenky má tloušťku 2 mm. Překližka byla očištěna, zbavená nečistot pomocí kartáče.



Obrázek 3.9 – Značení 1. vzorku lepenky

Na 1. vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimální technické parametry byly zvoleny: výkon 10 %, posuvová rychlost $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, toto nastavení vykazuje nejlepší povrch gravírované plochy. Lepenka je materiál s velmi dobrou obrobitelností. S výkonem pouhých 10 % bylo dosaženo dostatečného označení materiálu. Kontrast i barevná sytost je na velmi dobré úrovni. Povrch materiálu není nijak degradovaný, došlo pouze k minimálnímu úbytku materiálu. Okraje jsou ostré bez zjevných vad a opalů. Při použití 20 % výkonu bylo dosaženo tmavšího označení materiálu, ale povrch je drsný. Okraje nesou stopy

opálení, což z estetického hlediska není ideální. Při použití výkonu na 40 % se podařilo vzorek téměř propálit. Povrch je velmi drsný a okraje nesou stopy výrazného opálení. S výkonem laseru na 60 % bylo dosaženo propálení v celé šířce lepenky. Z toho důvodu je potřeba výkon laseru snížit nebo zvýšit posuvovou rychlost. Takto nastavený laser je zcela nevhodný pro daný materiál. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 8 minut.



Obrázek 3.10 – Značení 2. vzorku lepenky

Na 2. vzorku bylo provedeno experimentální značení při následujících technických parametrech: výkon laseru: 10 %, 20 %, 40 % a 60 % při konstantní posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Optimální technické parametry byly zvoleny: výkon 20 %, posuvová rychlost $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Toto nastavení vykazuje nejlepší povrch gravírované plochy. Při tomto výkonu vypadá značená plocha nejlépe. Kontrast je velmi uspokojivý, barevná sytost dosahuje mimořádné úrovně. S takto nastaveným laserem je možno značit za dekorativním účelem, například při brandingu desek diáře. Při použití výkonu na 10 % se značení dostatečně neprojeví a kontrast je velmi slabý. Výkon laseru na 40 % zanechal hezký povrch, ale nevýhodou toho nastavení je opal kolem okrajů, degradace okolního materiálu je z estetického hlediska nepřijatelná. Při výkonu na 60 % a posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ nedošlo k propálení, ale materiál je téměř průsvitný. Toto nastavení není vhodné pro lepenku o tloušťce 2 mm. Pracovní čas, který potřeboval laser při posuvové rychlosti $300 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ k označení materiálu, byl 5,8 minuty.

4 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala nekonvenční technologií, přesněji laserovým gravírováním při značení rozdílných typů materiálů s využitím CO₂ laseru.

V teoretické části této bakalářské práce byl velký důraz kladen na vysvětlení principu, jak samotný laser funguje, z čeho se skládá, jak jej můžeme rozdělit a kde jej můžeme použít.

V praktické části této bakalářské práce byl největší prostor věnován značení 5 odlišných typů materiálů, a to oceli ČSN 11 373, hliníku EN AW7075, plexisklu XT, překližce a lepenice. Pro všechny tyto materiály jsme našli optimální technické parametry (výkon a posuvovou rychlost laseru). U oceli byly zvoleny optimální technické parametry: výkon 40 %, posuvová rychlost 150 mm·s⁻¹. U slitiny hliníku povrch vykazoval nejlepší vlastnosti při použití výkonu 60 % a posuvové rychlosti 150 mm·s⁻¹. U značení plexiskla, překližky a lepenky byly testovány vždy dva vzorky, a to s rozdílnou posuvovou rychlostí 200 mm·s⁻¹ a 300 mm·s⁻¹, z důvodu zjištění maximální efektivnosti laserového zařízení. Ideálního výsledku u značení plexiskla se dosáhlo při výkonu 20 %, posuvové rychlosti 200 mm·s⁻¹ a u druhého vzorku při výkonu 40 %, posuvové rychlosti 300 mm·s⁻¹. Dalším testovaným materiálem byla překližka. Ta na svém povrchu vytvoří nejlepší označení při použití výkonu na 10 %, posuvové rychlosti 200 mm·s⁻¹ a u druhého vzorku při výkonu 20 % a posuvové rychlosti 300 mm·s⁻¹. Posledním vybraným materiálem byla lepenka. Značení toho materiálu je velmi snadné i pro méně výkonné lasery. Pro optimální označení jsme zvolili výkon 10 %, posuvovou rychlost 200 mm·s⁻¹ a u druhého vzorku výkon 20 % při posuvové rychlosti 300 mm·s⁻¹. Fotografie, které jsou dokládány k jednotlivým materiálům, nemusí zcela odpovídat realitě, konkrétně u lesklých materiálů jsou vidět odrazy, které narušují celkový vzhled a dojem obrázku.

Obecně se dá říct, že kovové materiály potřebují k označení vyšší výkon a menší posuvovou rychlost. U plexiskla, překližky a lepenky jsme ideálních výsledků dosáhli s nižším výkonem a s vyšší posuvovou rychlostí.

Výsledkem tohoto experimentu bylo zjištění, že maximální výkon nemusí vždy zajistit nejlepší označení vzorku a pro každý materiál je potřeba nastavit na laseru rozdílné podmínky při značení pomocí gravírování.

5 Seznam použité literatury

- (1) HUBÍK, Petr. *Technologie laserového popisování*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013, 84 s. (61 161 znaků). [cit. 24.4.2018] Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/24662>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Sýkorová, Libuše.
- (2) HUBÍK, Petr. *Aplikační možnosti nízko-výkonného CO2 laseru při popisování (značení)* [cit. 24.4.2018] materiálů. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2015, 106 s. (92 581 znaků). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/33597>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Sýkorová, Libuše.
- (3) MAŇKOVÁ, I. *Progresívne technologie*. Vienaľa Košice, 2000. 270 s. [cit. 19.4.2018] ISBN 80-7099-430.3.
- (4) PRŮMYSLOVÉ LASERY V PRAXI. *MMSpektrum* [online]. ČR: AG TOP TIP, 2018 [cit. 19.4.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- (5) PRŮMYSLOVÉ LASERY. *MMSpektrum* [online]. ČR: AG TOP TIP, 2018 [cit. 19.4.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/slab-innoslab-kotoucovy-nebo-vlaknovy-laser.html>
- (6) BRIMUS, Jan. *Vliv koncentrované energie laserového paprsku na různé polymerní materiály*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007, 180 s., 17 s. příloh. [cit. 28.4.2018] Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/4374>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Sýkorová, Libuše.
- (7) MRŇA, Libor. Řezání laserem. In: *HSV* [online]. 2013 [cit. 18.4.2018]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__rezani_laserem_2013__mrna.pdf

- (8) NEKONVENČNÍ METODY OBRÁBĚNÍ. *MMSpektrum* [online]. AG TOP TIP, 2018 [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvencni-metody-obrabeni-5-dil.html>
- (9) GRAVÍROVACÍ A ŘEZACÍ CO2 LASER E 4060. *Svarecky-obchod* [online]. ČR: David-Studio, 2018 [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <https://www.svarecky-obchod.cz/kovoobrabeci-stroje/cnc-lasery/29271-gravirovaci-a-rezaci-co2-laser-e-4060.htm>
- (10) LMM6000 Černá na kov. *THERMARK* [online]. ČR: Laser system, 2009 [cit. 5.1.2018]. Dostupné z: <http://www.thermark.cz/lmm6000.html>
- (11) JAKOSTI OCELÍ. *FEROMAT* [online]. BRNO: FEROMAT, 2010 [cit. 23.2.2018]. Dostupné z: http://www.feromat.cz/jakosti_oceli
- (12) HLINÍKOVÉ SLITINY. *PRIMAPOL* [online]. ČR: PRIMAPOL, 2018 [cit. 6.3.2018]. Dostupné z: https://www.primapol.cz/produkty/hlinik/?gclid=CjwKCAjwoKDXBRAAEiwA4xnqv0Gp0w1hvE_9IkTihIcNWl_LkTgTiuYtKVdJGJ5Ch6oSBEF72WEA6BoCke4QAvD_BwE
- (13) POLYCASA XT. *PLASTPARTNER* [online]. ČR: MOVIO, 2016 [cit. 5.2.2018]. Dostupné z: <http://www.plastpartner.cz/plexisklo-POLYCASA-XT>
- (14) PŘEKLIŽKA. *WIKIPEDIA* [online]. ČR: MEDIAWIKI, 2017 [cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Překližka>
- (15) LEPENKA. *WIKIPEDIA* [online]. ČR: MEDIAWIKI, 2017 [cit. 15.2.2018]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Hladká_lepenka

- (16) SLITINA HLINÍKU EN AW 7075. *TECHPORTÁL* [online]. ČR: Verlag Dashöfer, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrODF32bS3UUhLT_peBZxsdE175N8MGgz73w
- (17) EN AW-7075 T6. *ALUNET* [online]. ČR: ALUNET, 2018 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-7075>
- (18) PLEXIGLAS. *ZENIT* [online]. PRAHA: E-SOLUTIONS, 2016 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: https://www.zenit.cz/public/media/Plasty/Zenit_Prospekt_Plasty_Plexiglas_CZ.pdf
- (19) OCEL ČSN 11 373. *CZ FERRO-STEEL* [online]. ČR: ISTUDIO, 2011 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: <http://www.czferrosteel.cz/pdf/tyce-11373.pdf>

6 Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obrázek 1.1 – Srovnání vyzařovaného světla laserem a žárovkou..... | 10 |
| Obrázek 1.2 – Absorpce, spontánní a stimulovaná emise..... | 10 |
| Obrázek 1.3 – Konstrukce základního laseru..... | 12 |
| Obrázek 1.4 – Režimy laserových paprsků..... | 16 |
| Obrázek 1.5 – Pevnolátkové lasery..... | 18 |
| Obrázek 1.6 – Nd:YAG laser..... | 18 |
| Obrázek 1.7 – Diskový laser..... | 19 |
| Obrázek 1.8 – Vláknový laser..... | 20 |
| Obrázek 1.9 – Způsoby gravírování..... | 23 |
| Obrázek 2.1 – Laser E4060..... | 25 |
| Obrázek 2.2 – Pracovní prostředí Lasercut 5.3..... | 26 |
| Obrázek 2.3 – Pracovní plocha Laseru..... | 26 |
| Obrázek 2.4 – Pasta LMM 6000 černé barvy..... | 27 |
| Obrázek 2.5 – Ocel ČSN 11 373..... | 29 |
| Obrázek 2.6 – Slitina hliníku EN AW 7075..... | 29 |
| Obrázek 2.7 – Plexisklo XT..... | 30 |
| Obrázek 2.8 – Překližka..... | 31 |
| Obrázek 2.9 – Lepenka..... | 31 |
| Obrázek 3.1 – Aplikace pasty LMM 6000 na ocel 11 373..... | 32 |
| Obrázek 3.2 – Značení vzorku ocel 11 373..... | 33 |
| Obrázek 3.3 – Aplikace pasty LMM 6000 na hliníkový vzorek opravdu..... | 34 |
| Obrázek 3.4 – Značení vzorku hliník EN AW 7075..... | 34 |
| Obrázek 3.5 – Značení 1. vzorku Plexisklo XT..... | 35 |
| Obrázek 3.6 – Značení 2. vzorku Plexisklo XT..... | 36 |
| Obrázek 3.7 – Značení 1. vzorku překližky..... | 37 |
| Obrázek 3.8 – Značení 2. vzorku překližky..... | 38 |
| Obrázek 3.9 – Značení 1. vzorku lepenky..... | 39 |
| Obrázek 3.10 – Značení 2. vzorku lepenky..... | 40 |

7 Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 2.1 – Technické parametry laseru E4060 | 24 |
| Tabulka 2.2 – Technické parametry | 28 |
| Tabulka 2.3 – Chemické složení | 28 |
| Tabulka 2.4 – Mechanické vlastnosti | 28 |
| Tabulka 2.5 – Chemické složení | 29 |
| Tabulka 2.6 – Mechanické vlastnosti | 29 |
| Tabulka 2.7 – Mechanické vlastnosti | 30 |

Tímto děkuji paní Ing. Šárce Malotové za odborné vedení a rady, kterými napomohla k vypracování této bakalářské práce.